

灵境遥操作技术及其发展

赵 猛, 张 珩, 陈靖波
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)



摘 要: 灵境遥操作是消减不确定大时延影响、增强系统透明度的一种有效方法。首先阐述了灵境遥操作的技术概念和原理, 提出了统一灵境遥操作系统的结构模型, 然后指出并分析了需要解决的几项关键技术, 最后对灵境遥操作的应用前景进行了展望。

关键词: 遥操作; 大时延; 结构模型; 虚拟现实

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2007) 14-3248-05

Technology of VR Teleoperation and Its Development

ZHAO Meng, ZHANG Heng, CHEN Jing-bo

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: VR teleoperation is an effective approach not only to eliminate the influence of the variant large time-delay but also to intensify the transparency of the system. Firstly, the technical conception and the principle of VR teleoperation were introduced, and a unified structure model of system was proposed. Then, the key technologies of VR teleoperation were pointed out and analyzed in details. At last, the prospects and development were proposed.

Key words: teleoperation; large time-delay; structure model; virtual reality

引 言

20 世纪 40 年代后期, ANL 实验室研制出第一台现代主从遥操作机械臂装置之后, 遥操作技术在实际需求的推动下飞速发展, 形成了主从遥操作、遥程序遥操作、监控遥操作等多种操作形式, 并在危险、恶劣的操作环境中发挥了积极的作用。60 年代后, 随着深海探测、空间实验的发展, 这些实践活动对遥操作提出了巨大的挑战。由于信息传输距离和通信链路等方面的原因, 导致通信链路存在不确定大时延 (0.4s ~ 20s) 以及有限的通信带宽, 使得操作专家无法及时获得充分的现场信息, 严重地影响了遥操作系统的稳定性和可操作性^[1-4], 并成为遥操作进一步发展和应用的“瓶颈”问题。

80 年代, 基于模型的预测技术和虚拟现实技术相结合应用于遥操作系统中, 形成了灵境遥操作。它不仅有效地消减了通信不确定大时延的影响, 缓解了信息链路的带宽压力, 而且具有全方位、多感态地反映现场工作状态的特点, 产生“身临其境”的沉浸感, 使得人类的感知和行为能力得到有效的延伸、拓展以至超越。

本文首先介绍了灵境遥操作的技术概念和原理, 讨论了其系统的结构设计, 并给出了统一灵境遥操作系统结构模型, 然后指出并分析了需要解决的几项关键技术, 最后对灵

境遥操作的发展前景进行了展望。希冀在此基础上, 促进灵境遥操作的进一步发展。

1 概念及原理

所谓灵境遥操作就是根据现场对象建立预测模型, 构成虚拟对象, 并利用预测技术和虚拟现实技术进行时延消减和增强显示的一种遥操作方法。灵境遥操作是一个高级的人机接口, 它将不能处于同一操作现场的操作员和操作对象有机地“对接”在一起, 构成了典型的人在回路的远程控制系统, 并在保证虚拟对象与真实对象相一致的条件下, 由操作员向虚拟对象发送遥操作指令, 通过预测模型实时或超时计算出状态响应信息, 并利用虚拟现实技术以多感态的形式反映虚拟对象的响应行为, 供操作员参考, 以弥补通信大时延和有限通信带宽造成的真实对象响应信息反馈不及时、不充分的缺陷, 同时将该遥操作指令投射到真实对象, 使其在远端一定的时延后重复仿真结果, 操作者仿佛在现场直接、连续、无时延地操作真实对象, 达到远程交互控制的目的。

灵境遥操作将人的经验、技能与远方机器紧密结合在一起, 充分利用人所固有的感觉和反应能力, 实现机器与人的高度协调。与其他遥操作方法相比, 在提高远程操作的效率、作业精细程度、减轻操作者负担等方面有着不可比拟的优点。目前形成了视觉、力觉以及运动觉等多种灵境遥操作形式, 并已经成为遥操作领域的研究热点^[5]。

• 视觉灵境遥操作

由于人类对外界信息感知的 70% ~ 80% 来自视觉, 因此视觉灵境遥操作在行走、接近目标等非接触作业时显得尤为

收稿日期: 2006-06-06 修回日期: 2006-07-31

基金项目: 国家 863 高技术(2004AA742060)

作者简介: 赵猛(1977-), 男, 辽宁抚顺人, 博士生, 研究方向为遥操作及现代控制理论; 张珩(1961-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博导, 研究方向为现代控制理论、智能化系统设计、面向空间应用的遥科学及微小航天器的轨道控制技术; 陈靖波(1980-), 男, 湖南郴州人, 硕士生, 研究方向为机器人学。

重要。1984 年, Sheridan 设计了用于遥操作的第一个视觉预测显示系统^[4]。随后许多机构对此进行了大量的研究, 并证明了视觉显示的有效性^[6-9]。

● 力觉灵境遥操作

当操作对象进行接触作业时, 如抓取、扭转、插入等, 动力学特征变得十分重要, 这些操作中 70% 的信息通过力觉来提供。力觉灵境遥操作将从手与环境的相互作用力通过传感器反馈到本地主手, 并使其对操作者产生相应的力觉反馈。虽然增加力觉反馈能够提高遥操作系统的操作性能, 但由于时延的存在, 系统的稳定性和透明性却会受到影响^[2,10]。

● 运动觉灵境遥操作

虽然运动觉对于视觉或力觉来说并不是必不可少的, 但在视觉或力觉遥操作的基础上增加运动觉, 可以使操作者更加逼真地沉浸于实际环境中。文^[11]中在遥操作机器人上的 6 个加速度传感器实现运动觉, 反馈回来的信号标志着机器人的姿态和运动信息, 利用反馈信号控制驱动 6 自由度运动模拟器实现运动觉的再现。

● 多感态灵境遥操作

随着环境和操作任务复杂性的不断提高, 单一感态的灵境遥操作难以满足操作员真切感受“现场”信息的需要。视觉与力觉混合、力觉与运动觉混合、视觉与力觉与运动觉混合等多种组合的灵境遥操作将提高仿真的逼真度, 使操作员操作于“真”“假”难辨的虚拟环境中。因此多感态是灵境遥操作发展的必然方向。

灵境遥操作虽然形式多样, 但就一般意义来说, 都应建立在以下三项基本原理基础之上:

1) 预测模型。预测模型的功能是依据对象历史和未来输入的信息预测其未来动态行为, 进而消减由通信时延造成的信息滞后的影响, 及时反映操作结果。预测模型只强调模型的功能而不强调其结构形式, 因此不仅状态方程、传递函数这类传统的参数模型可以作为预测模型, 甚至阶跃响应、脉冲响应以及神经网络^[12-13]这类非参数模型, 只要具备预测功能都可以在遥操作系统中作为预测模型使用。

2) 多感态反馈。多感态反馈是指利用虚拟现实技术将虚拟对象的响应信息以多种感觉形态反映给操作员, 给人以直观刺激, 提高操作员对操作信息感知和决策的质量。其中虚拟现实技术(Virtual Reality)借助于视觉、听觉、力觉、触觉等传感器及相应的设备, 使人在与所构造的虚拟对象进行相互作用的过程中产生“身临其境”的沉浸感, 为用户提供一种崭新和谐的人机交互遥操作作业环境。

3) 误差校正。预测模型的精度是灵境遥操作能否有效消减时延影响的关键问题。然而在实际用中, 对象十分复杂, 并且对象结构、参数和环境具有很大的不确定性, 其数学模型很难精确建立。因此为了提高系统鲁棒性, 引入反馈修正环节, 利用系统获取的实测信息校正仿真的静态误差和模型误差, 以提高预测仿真的置信度和操作精度。

2 结构模型

由于灵境遥操作应用的领域、操作的对象以及反馈感态等方面的差别, 到目前为止没有形成一种标准的系统结构框架, 不利于系统的结构设计和性能分析。经过分析研究, 提出了统一灵境遥操作系统结构模型, 如图 1:

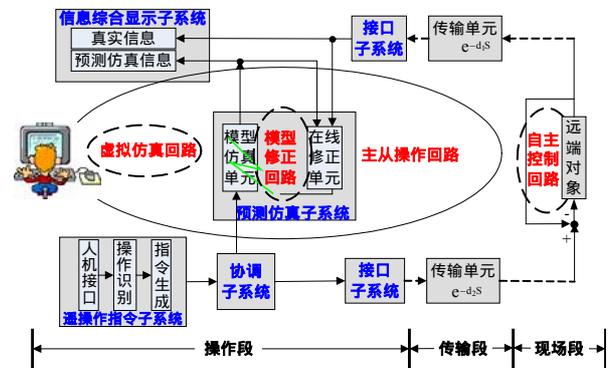


图 1 灵境遥操作系统结构示意图

整个系统由三段组成: 现场段、传输段和操作段。现场段由远端被控对象及其控制器构成; 传输段分为上行传输单元和下行传输单元, 传输时延为 (d_1+d_2) ; 而操作段由操作员和五个子系统构成。其中指令子系统的功能是识别人的操作行为, 产生相应的遥操作指令序列; 信息综合显示子系统是将虚拟对象或真实对象的信息融合、重构, 并以恰当感态形式反映操作结果; 预测仿真子系统的主要功能是建立虚拟对象, 通过实时或超时计算出虚拟对象的响应信息, 以消减时延的影响, 并通过误差修正环节提高仿真预测精度; 协调子系统主要包括协调处理信息流、指令安全性检测、时统、控制时间/空间离合器等任务; 接口子系统主要用来接收/发送上下行信息流。

从控制角度分析, 该遥操作系统由四个控制回路组成。其中, 由操作员、指令子系统、协调子系统、接口子系统、信息综合子系统和传输单元、远端被控对象构成主从操作回路, 这是遥操作最基本、最直接的控制回路, 由于该回路受通信大时延的影响, 所以必须采用“停-走-停”的操作模式, 工作效率低下, 主要用于处理意外、突发事件; 由预测仿真单元、指令子系统、信息综合子系统与操作员共同构成一个以预测模型仿真信息为基础的虚拟仿真回路, 在该回路中操作员将虚拟对象当作真实对象, 实现无时延的灵境遥操作, 有效地消减了不确定大时延的影响, 并且可以利用预测仿真子系统的超时预测功能, 预先验证遥程序的执行效果, 以确保其上行后能安全有效地执行; 此外, 为了保证预测模型与真实对象的一致性, 引入了模型修正回路, 利用仿真信息和下行的实测信息实现模型误差在线修正, 从而保证了灵境遥操作系统的在线应用; 另外, 在轨部分还具有自主控制回路, 以执行遥操作指令。该遥操作系统在充分发挥灵境遥操作效能的情况下, 通过时间/空间离合器的灵活切换, 发挥了主

从模式和遥程序模式的特点,有效提高了整个遥操作系统的
安全性、鲁棒性和高效性。

因此,该“三段四回路”的灵境遥操作系统结构,不仅具
有模型在线修正功能,保证了虚拟遥操作系统的在线应用,
而且统一了灵境遥操作、主从遥操作和遥程序遥操作三种模
式,并将为日后的遥操作系统设计提供必要的参考。

3 关键技术分析

灵境遥操作涉及控制论、机器人、电子、计算机、信息
科学、传感和生理等多个领域。目前,研究热点主要集中在
以下几项关键技术方面:

3.1 建模及模型修正技术

灵境遥操作中的模型包括现场操作环境的几何模型和
操作对象的机理模型。模型的精度是影响灵境遥操作能否有
效消减时延、提高操作精度的重要因素,因此建模及模型修
正成为灵境遥操作的关键技术之一。灵境遥操作随着应用范
围的扩大,从结构化环境中的重复性操作发展到非结构化环
境下的非重复性操作,因此动态在线建模技术受到越来越多的
重视。文[14]采用 CAD 技术获取三维数据建立虚拟环境
模型,但该方法只适用于有规则的环境,难以解决非结构化
环境的建模问题。文[15]采用非接触式的视觉的交互式建模
技术,但实时性差,计算量大。文[1]采用 AUDI 辨识算法建
立对象的物理模型。动态在线建模技术目前尚未发展成熟,
计算的实时性和准确性仍需进一步提高。

在实际应用中,系统不可避免地存在建模误差和累计误
差,并受某些不确定性因素的影响,导致虚拟对象与真实对
象的状态不一致,这些误差的存在不仅降低了预测的效果和
精度,还可能导致在实际操作中出现误操作。因此利用现场
真实的信息去修正预测误差,可以提高系统的鲁棒性和抗干
扰能力。文[16-17]提出了一种基于多传感器的空间遥操作机
器人虚拟环境的建模方法,该方法利用真实的传感器信息建
立和修正模型参数。有的学者^[17-9]对操作对象或环境误差采
用视频图像通过视觉定位技术来获取,然后利用提取出的信
息进行状态更新或模型修正。文[18]是将远端反馈的视频信
息和虚拟仿真图形在同一显示窗口中进行叠加和融合,从而
找出它们之间的差异,并在必要的时候利用传感器信息对预
测模型进行及时修正,或对远端机器人发出修正的命令,使
得他们的运动相吻合,最终消除误差,提高遥操作的精度。
上述这些方法都属于“停-改-走”的离线修正模式,误差无法
得到及时在线的修正,而且无形中降低了系统的工作效率,
操作的连续性差。在线修正方法可以实时校正误差,提高系
统的鲁棒性,但受遥操作系统中不确定大时延和有限带宽等
因素的影响,目前还没有一种在线修正方法能在此条件下对
误差进行有效的监视与修正。

3.2 虚拟现实技术

虚拟现实是灵境遥操作实现临场感的关键组成部分,它

通过视觉、听觉、触觉等多种感态形式实现友好的人机交互。
1968 年 Ivan Sutherland 最先设计出了头盔式立体显示器^[19]。
随后人机交互设备有了长足的发展,出现了数据手套、立体
头盔、数据衣、空间鼠标等设备。但如何将融合后的信息通
过虚拟现实自然地、全面地、真实地反映给操作员并将操作
员的指令准确地发送给被控对象即完全沉浸的人机交互技
术方面仍然具有较大的发展空间。目前,许多机构致力于高
性能图形图像处理、新型传感和感知机理、增强显示、实时
漫游技术、姿态跟踪性能、语音识别、立体声音输入输出、
广角立体显示等方面的研究。

3.3 信息采集与融合技术

信息采集与融合技术就是把来自各种探测器、传感器、
媒体、层次、角度、时间等数据进行联想、相关和组合,从
而得出精确的特性判断。在遥操作系统中包括虚拟对象和真
实对象的信息采集和融合,它具有以下优点:1) 能够提供
稳定的工作性能,增加了信息的冗余性和可靠性;2) 对同
一目标进行多次和多种测量,并进行有效的综合,以提高信
息的准确度;3) 可以扩大对时间和空间的覆盖范围,减少
探测盲点。信息融合主要有硬件融合和软件融合两个方向。
目前以软件融合为主,并且研究重点集中在“虚”与“实”
信息的采集与融合技术和视觉、力觉、触觉及运动觉的多信
息融合技术^[10]等方面。

3.4 系统性能分析

稳定性和透明度是评价灵境遥操作系统性能的重要指
标。一些学者提出了基于无源性、散射、波变量理论等方法
分析了系统的稳定性^[10,20-23],这些方法具有较大的保守性。
LQG 控制^[24]、 H_{∞} 控制^[25]和 Lyapunov-like 函数^[26]等方法虽然
可以得到较好的系统性能或在优化指标意义下的稳定控制,
但都需要对系统的时延有足够的了解。基于事件的方法也可
以得到对任意时延的稳定控制,且不需要知道时延的任何特
征,但系统的操作性能却有待改善,尤其是如何寻找到一个
合理的非时间参考变量是个技术问题。而滑模控制方法^[27]
除了自身固有的缺陷如抖动外,在系统的操作性能方面的效
果也不理想。文[28]从频域的角度分析系统性能。稳定性是
遥操作系统的基础,透明性决定系统的操作性能。文[29]
K.Hashtrudi-Zaad 等人用四通道方法分析了系统在时延条件
下的透明性。文[23,30]利用阻抗匹配条件来衡量系统的透
明度。文[31]论述了遥操作系统的稳定性和透明度之间是一
个相互对立的关系,没有操作者的正确感知,就没有正确的
决策,稳定性就失去了意义。因此,在不确定大时延条件下
如何将系统稳定性与透明度相结合,转变成为一种合理的优
化指标等方面有待进一步研究。

除了上述技术外,灵境遥操作中还包括大容量信息实时
压缩技术、任务规划技术、遥操作信息流的实时分发、调度
与协调技术、人工智能等技术。

4 结论

随着航天飞机、空间实验和星球探测的发展,人类活动已经进入了一个新时代——空间时代,空间资源必将成为国际上继地面资源争夺后又一激烈竞争的焦点之一,灵境遥操作作为空间资源的开发提供了一种有效技术手段:灵境遥操作可以辅助操作员完成空间交会对接、燃料补给、维修等在轨服务,不仅可以减小宇航员从事危险工作的代价和成本,而且提高了设备可用性和利用率;灵境遥操作还可以辅助操作专家在地面上完成空间实验,这不仅保护了操作专家的生命安全,提高了经济效益,而且支持多用户对同一实验的共享,满足了多名操作专家同时参与空间实验的愿望,使身处异地的专家在“同一环境”中完成同一目标的协作;灵境遥操作的离线应用可以训练操作员的操作技巧,不仅提高了实际操作的灵活性、安全性和高效性,而且降低了操作员训练的经济成本;未来的第七代战争是双方一体化 C⁴ISR 体系间的对抗,战场远程化、数字化、适时化和无人化,因此发展灵境遥操作可以提高我国的空间防御和对抗能力。

但目前灵境遥操作处于发展阶段,基础理论和技术仍不成熟。国内外许多研究单位在此方面进行了大量的研究,但仍有许多问题尚待解决,主要有以下几个方面:

1) 系统结构设计方面。灵境遥操作的形式和应用领域不断地扩大,其结构设计的冗余性和安全性仍需要继续深入的研究;

2) 性能指标方面。未来的在轨服务、空间试验、军事应用等对灵境遥操作的实时性、准确性、鲁棒性、稳定性和透明性等性能指标提出了更高的要求,因此应当对建模/修正、虚拟仿真计算等关键技术进行深入的研究,而且需加强系统集成方面的研究,以追求系统整体性能的最优,提高灵境遥操作水平;

3) 人机交互方面。积极开展虚拟现实、信息融合、人机接口等方面的研究,提高操作员操作、决策的正确性和自然感知度,以实现完全的“人”“机”融合;

4) 理论分析方面。结合信息、控制、图形图像学、心理学等理论,深化、丰富灵境遥操作理论,为其实用化提供坚实的理论基础。

可以预见,灵境遥操作的经济性、灵活性和高效性等发展潜力是其它遥操作模式无法比拟的。因此,灵境遥操作必将成为未来遥操作发展的必然趋势。

参考文献:

[1] 曾庆军, 徐涛, 徐晶晶, 等. 时延力觉临场感遥操作机器人系统预测控制研究 [J]. 东南大学学报, 2004, 34(增刊): 160-164.
[2] Yokokohji Y, Imaida T, Yoshikawa T. Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication delay [J]. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(S1050-4729), 2000, 3(18): 2684-2689.
[3] Xi N, Tarn T J. Stability analysis of non-time referenced Internet based

terelobotic systems [J]. Robotics and Autonomous System(S0921-8890), 2000, 32(2): 173-178.
[4] Sheridan T B. Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis [J]. IEEE Tran. On Robotics and Automation(S1042-296X), 1993, 9(5): 592-606.
[5] 刘伟军, 朱枫, 董再励. 虚拟现实辅助机器人遥操作技术研究 [J]. 机器人, 2001, 23(5): 385-390.
[6] Sheridan T B. Human Supervisory Control of Robot Systems [C]// In: Proc. Of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, New York: IEEE, 1986: 808-812.
[7] 丑武胜, 孟德, 陈建新, 等. 空间科学实验机器人辅助遥操作系统 [J]. 中国空间科学技术, 2003, 23(6): 7-13.
[8] Kim W S, Donald B. Gennery, Eugene C. Chalfant. Computer Vision Assisted Semi-Automatic Virtual Reality Calibration [J]. IEEE Proc. Int. Conf. On Robotics and Automation(S1050-4729), 1997, 2(12): 1335-1340.
[9] Kim W S. Virtual Reality Calibration and Preview/Predictive Displays for Telerobotics [C]// Presence, MIT Press, Cambridge: Journals DEPT, 1996: 173-190.
[10] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperations with time delay [J]. IEEE Transactions on Automatic Control(S0018-9286), 1989, 34(3): 494-501.
[11] 刘寒冰, 赵丁选. 临场感遥操作机器人综述 [J]. 机器人技术与应用, 2004, 22(1): 42-45.
[12] Huang Jinquan, Xu Liang. Neural network smith predictive control for telerobots with time delay [J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(S1005-1120), 2001, 18(1): 35-40.
[13] Huang Jinquan, Lewis F L, Liu K. A neural net predictive control for telerobots with time delay [J]. Journal of Intelligent and Robotics System(S0921-0296), 2000, 29(3): 1-25.
[14] 曾建超, 徐光佑. 虚拟现实技术及其发展策略 [J]. 电子学报, 1995, 23(10): 57-61.
[15] Hasegawa T, Kamyama S. Geometric Modeling of Manipulation Environment with Interactive Teaching and Automated Accuracy Improvement [J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers(S0453-4654), 1989, 25(12): 1371-1378.
[16] 李会军, 刘威, 宋爱国. 基于多传感器空间遥操作机器人虚拟环境建模 [J]. 宇航学报, 2005, 26(9): 558-561.
[17] Young J L, Jung A Y, Myung J C. Interactive virtual space calibration for teleoperation [C]// IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, Piscataway: IEEE, 1997: 472-476.
[18] Milgram P, Yin S, Grodski J J. An augmented reality based teleoperation interface for unstructured environments [C]// ANS 7th Topical Meeting on Robotics & Remote Systems, August, Georgia: ANS, 1997: 966-973.
[19] Sutherland I E. A Head-mounted Three Dimensional Display [C]// Proceedings of Fall Joint Computer Conference, Thompson Books, 1968: 757-764.
[20] Anderson R J, Spong M W. Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay [J]. The International Journal of Robotics Research(S0278-3649), 1992, 11(2): 135-149.
[21] Calcev G, Gorez R, De Neyer M. Passivity approach to fuzzy control systems [J]. Automatica(0005-1098), 1998, 34(3): 339-344.
[22] Eusebi A, Melchiorri C. Force reflecting telemanipulators with time-delay: Stability analysis and control design [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation(S1042-296X), 1998, 14(4): 635-640.
[23] 景兴建, 王超越, 谈大龙. 遥操作机器人系统时延控制方法综述

[J]. 自动化学报, 2004, 30(2): 214-223.

[24] Brierley S D, Chiasson J N, Lee E B, *et al.* On stability independent of delay for linear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control(S0018-9286), 1982, 27(2): 252-254.

[25] Leung G M H, Francis B A, Apkarian J. Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation(S1042-296X), 1995, 11(1): 105-116.

[26] Mrdian Jankovic. Control Lyapunov-Razumik-hin functions and robust stabilization of time delay systems [J]. IEEE Transactions on automatic Control(S0018-9286), 2001, 46(7): 1048-1060.

[27] Park J H, Cho H C. Sliding-mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay [C]// In: Proc. of the 1999 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta, USA: IEEE, 1999: 311-316.

[28] Yokokohji Y, Yoshikawa T. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling formulation and experiment [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation (S1042-296X), 1994, 10(5): 605-620.

[29] Hashtrudi Z K, Salcudean S E. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation(S1042-296X), 2002, 18(1): 101-114.

[30] 邓启文, 韦庆, 李泽湘. 大时延力反馈双边控制系统 [J]. 机器人, 2005, 27(5): 410-413.

[31] Hashtrudi Z K, Salcudean S E. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators [J]. The International Journal of Robotics Research (S0278-3649), 2001, 20(6): 419-445.



(上接第 3199 页)

0,可以看出资源利用率偏低是由于资源的空闲时间造成的,空闲时间的产生原因是任务虽然已经可使用资源,但是要等待其它任务完成后才能开始执行,当任务之间没有依赖关系时,获取资源就马上能执行,那么所有资源的空闲时间均为零,此即元任务调度,另外从分配结果上可以看出分配给资源 0 的任务数为 6,而分配给资源 2 的任务数仅为 2,这是因为从 *ETC* 矩阵可看出,资源 0 除任务 10 外,执行其它任务的时间在所有资源中都是最短的,蚁群算法为了优化 *makespan*,在分配任务时都会优先选择分配给资源 0,于是分配给资源 0 的任务数较多,执行任务时间长的资源分配较少任务,以避免任务长时间等待,从而保证负载均衡。

4 结论

网格用户提交的应用程序被划分为多个子任务时,任务调度问题由于任务间的依赖和约束而更为复杂。本文在分析参数相关任务调度时引入虚任务节点,以一个 DAG 表示和管理任务队列,遵循“按深度值排序”原则避免运行“死锁”,遵循“父节点优先,短任务优先”原则减少任务节点运行堵塞延迟,从而较好解决了网格环境中参数相关任务调度问题,实验结果证明了设计方案的正确性。同时算法利用蚁群算法在任务相互依赖关系较杂时最大程度地减少了资源的总体时间 *makespan* 和提高了资源利用率,分配结果同时也体现了深度排序的原则,总是同一深度值的任务先分配完毕再分配下一深度值的任务。但是算法也有值得改进的地方,如实验中资源 2 的利用率偏低,执行完任务 5 后就一直空闲,这时可以考虑其它规则将别的任务分配给它执行,从而进一步减少 *makespan*,提高利用率。同时算法的步骤过多,操作复杂,需要进一步系统化。

参考文献:

[1] Hironori Kasahara. Seinosuke Narita Practical multiprocessor scheduling algorithms for efficient parallel processing [J]. IEEE Trans on Computers(S0018-9340), 1984, 33(11): 1023-1029.

[2] Armstrong R, Hensgen D, Kidd T. The relative performance of various mapping algorithms is independent of sizable variances in

run-time predictions [C]// 7th IEEE Heterogeneous Computing Workshop. Washington D.C: IEEE Computer Society, 1998: 79-87.

[3] Freund RF, Gherrity M, Ambrosius S, *et al.* Scheduling resources in multi-user, heterogeneous, computing environments with SmartNet [C]// 7th IEEE Heterogeneous Computing Workshop. Washington D.C: IEEE Computer Society, 1998:184-199.

[4] Singh H, Youssef A. Mapping and scheduling heterogeneous task graphs using genetic algorithms [C]// 5th IEEE Heterogeneous Computing Workshop. Washington D.C: IEEE Computer Society, 1996: 86-97.

[5] Xu Zhihong, Hou Xiangdan, Sun Jizhou. Ant Algorithm—based Task Scheduling in Grid Computing [C]// IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Washington D.C: IEEE Computer Society, 2003: 1107- 1110.

[6] Edwin S H, Hou Nirwan Ansari. Genetic algorithm for multiprocessor scheduling [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems(S1045-9219), 1994, 5(2):113-120.

[7] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[8] 汪镭, 吴启迪. 智能蚁群算法及应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.

[9] Dorigo M, Gambardella LM. Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem [J]. Biosystems(S0303-2647), 1997, 43 (2):73-82.

[10] Stützle T, Dorigo M. ACO Algorithms for the Quadratic Assignment Problem [C]// New Methods in Optimization. London: McGraw-Hill, 1999: 3-50.

[11] Colomi A, Dorigo M. Ant System for Job-shop Scheduling [J]. Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science(S0770-0512), 1994,34(1): 39-53.

[12] Schoonderwoerd R, Holland O, Bruten J, *et al.* Ant-based Load Balancing in Telecommunications Networks [J]. Adaptive Behavior(S1059-7123), 1996, 5(2):169-207.

[13] Liang Yc, Smith Ae. An Ant System Approach to Redundancy Allocation [C]// Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Piscataway. New York: IEEE Press, 1999: 1478-1484.

[14] Thomas S, Holger H H. MAX-MIN ant system [J]. Future Generation Computer Systems(S0167-739X), 2000, 16(8): 889-914.

[15] Stützle T, HoosH. MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem [C]// Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. New York: IEEE Press, 1997:309-314.

[16] 钟求喜, 谢涛, 陈火旺. 基于遗传算法的任务调度与分配 [J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(10): 1197-1203.